费米耀变体的射电波段周期性光变研究

文 一，肖宇婷，李孝攀，杨海燕 *

（昭通学院 物理与信息工程学院，云南 昭通 65700）

摘要：运用 REDFIT 方法对 4 个费米耀变体的 MOJAVE（Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments）15.3 GHz 观测数据进行了周期分析，发现 0851+202 存在 1.77 年的周期成分，1308+326 存在 8.69 年的周期成分，1641+399 存在 2.04 年的周期成分，2251+158 存在 7.65 年的周期成分，且这些周期成分的置信度均大于 99%。运用超大质量双黑洞模型和螺旋喷流模型对这些周期成分进行了解释，并估算了这 4 个耀变体的中心黑洞质量为$10^9 M_\odot \sim 10^{10} M_\odot$。

关键词：耀变体；REDFIT 方法;光变周期；中心黑洞质量

中图分类号：P157.7　　**文献标识码**：A

1 引言

耀变体是活动星系核(Active Galactic Nuclei，AGN)中性质最为特殊的一个子类，它包括蝎虎天体(BL Lac objects)和平谱射电类星体(FSRQs)。耀变体具有高偏振和高光度等性质。耀变体的重要特征之一就是其光变。根据长期的观测发现，耀变体不仅具有短时标光变，还具有中等时标和长周期光变。利用观测到的光变时标可以估计一些重要的物理量如辐射区半径大小、亮温度、中心黑洞质量、辐射区域大小、多普勒因子等，从而为辐射模型建立提供了关键特征量[1-2]。虽然活动星系核的光变曲线一般是随机的、非周期性的[3-4]，但随着近年来观测数据的不断积累和周期分析方法的不断完善，越来越多的具有高置信度的周期

基金项目：国家自然科学基金（11903028)资助
作者简介：文一，男，本科生，主要研究活动星系核，Email：wenyi1353734093@qq.com
＊通讯作者：杨海燕，女，讲师，主要研究活动星系核，Email：245036344@qq.com

性光变被发现，例如:AO 0235+164 具有 8.13 年的光变周期[5]，PKS 0219-164 具有 270±26 天的光变周期[6]，PKS 0405-385 具有 2.8 年的光变周期[7]，S5 1044+71 具有 3.06±0.43 年的光变周期[8]，J0849+5108 具有 176 天的周期[9]。耀变体周期性光变的研究对探索活动星系核中心黑洞的结构、物理特性、动力学和辐射机制有重要作用[10]。

近年来，国内外针对活动星系核周期性光变的研究已经由单个源向数个源或大样本过渡。例如，Bhatta 等[11]对 12 颗蝎虎天体和 8 颗平谱射电类星体进行了深入的时域分析，他们在这些源的 Lomb-Scargle 和 WWZ 周期图中，发现 S5 0716+714、Mrk 421、PKS 2155−304、PKS 1424−418 和 ON +325 等具有年为单位的准周期振荡，且这些准周期振荡的置信度均大于 99%。Peñil 等[12]利用费米大面积望远镜(Fermi-LAT)提供的 9 年γ射线数据，使用十种不同的方法对 2274 个活动星系核(AGN)的光变曲线中的准周期信号进行了深入的研究，发现具有高置信度水平的源只有 11 个，其中有 9 个源的周期性之前尚未确定，具有低置信度水平的源有 13 个，同样有 9 个源的周期性之前尚未确定。他们认为活动星系核周期性光变的解释有多种，例如超大质量双黑洞模型、薄吸积盘理论等。所以，进一步研究这类源的光变特性和天体物理性质具有重要意义。本文搜集了 MOJAVE(Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments)的射电波段观测数据，采用 REDFIT 方法对这些耀变体的光变曲线进行了分析，利用超大质量双黑洞模型和螺旋喷流模型对得到的光变周期进行了解释，并计算了它们的实际物理驱动周期和主黑洞质量。

2 观测数据的选取

MOJAVE 是一项针对北天区活动星系核射电喷流活动性的甚长基线阵列长期监测项目[13]（https://www.cv.nrao.edu/MOJAVE/index.html）。它的观测目标有 518 个，其大部分数据的观测时间可以追溯到 1994 年。MOJAVE 释放的大量高质量数据被广泛应用于活动星系核的多波段研究中。为了研究耀变体可信的长周期光变时标，应选取观测时间跨度足够长，数

据点较多的样本。具体的筛选条件如下：

(a)观测时间跨度:T≥15年;

(b)年平均数据点M>4。

在这样的筛选条件下，初步筛选出了一批样本，但是为了得到的光变周期更加可靠，本文在周期分析结果的基础上，给出了另一个限定条件：观测时间跨度T与光变周期P的比值需大于等于1.5[14]，在此限定条件下，进一步简化样本，得到了满足条件的4个耀变体源。表1中列出了这4个耀变体的基本参数，第(1)列是这4个耀变体的源名，第(2)列是这4个耀变体的类型，第(3)列是它们的Fermi-LAT名，第(4)列是他们的红移，第(5)列是对它们观测的起止时间，第(6)列是观测时间跨度，第(7)列是年平均数据点数,用AADP(Annual Average Data Points)来表示。

3 REDFIT 方法

目前，对耀变体周期性的光变研究方法主要有功率谱方法,Jurkevich 方法,小波分析法，离散相关函数方法等[15-16]。但周期提取算法对时间序列的分析往往会受到随机噪声的影响，进而造成检测结果的不确定性。为了周期分析的准确性，我们需要在周期分析中考虑到随机噪声带来的影响以及对置信度进行分析。在天文学、气象学和地理学的数据中，这些随机噪声一般是由随机过程产生的，并且它们的功率谱服从幂律分布，即 $P(f) \propto f^{-\alpha}$,$P(f)$是功率谱,α是谱指数。特别地，当$1 < \alpha \leq 2$时表现为所谓的红噪声[3, 6, 10-11]。红噪声的存在会在周期图的低频段产生一系列虚假的峰[17]。

本文采用一阶自回归过程(AR1)模型对耀变体光变曲线中的红噪声背景进行描述[18]。AR1 模型通常被用作零假设，以评估时间序列中记录的变异性是否与这种类型的随机起源一致。本文采用由 Schulz 等[19]开发的 REDFIT 程序对耀变体的光变曲线进行分析。该程序直接从不均匀间隔的时间序列中估算 AR1 参数，即无需插值,然后将估计的 AR1 模型从时

域转换为频域。其理论方法是：对于任意间隔的时间 t_i（$i = 1,2,3,\ldots\ldots N$），有一个离散的 AR1 过程r

$$\rho_i = \exp(-(t_i - t_{i-1})/\tau) \quad (1)$$

其中常数τ表示 AR1 过程的特征时间尺度，ε表示均值为零，方差为$\sigma_\varepsilon^2 \equiv 1 - \exp(-2(t_i - t_{i-1})/\tau)$的“白色”高斯噪声。这个方差$\sigma_\varepsilon^2$的值确保了 AR1 过程的稳定性并且使其具有单位方差。公式（1）时域过程对应的频谱$G_{rr}(f_j)$为：

$$G_{rr}(f_j) = G_0\left(\frac{1-\rho^2}{1 - 2\rho\cos\left(\frac{\pi f_j}{f_{Nyq}}\right) + \rho^2}\right) \quad (2)$$

其中f_j表示截至 Nyquist 频率f_{Nyq}的离散频率，G_0表示平均振幅谱。平均自相关系数ρ是由抽样间隔$\Delta t = (t_N - t_1)/(N-1)$和$\rho \equiv \exp(-\Delta t/\tau)$的算术平均值计算得到的。常数$\tau$的值是由 Mudelsee 等人[20]设计的最小二乘法从间隔不均匀的时间序列中估计出来的。在不需要插值的情况下，利用 Lomb - Scargle 傅里叶变换确定了一个不规则间隔时间序列的频谱。Schulz 等人[21]为此提出了一个计算机程序，该程序利用了所谓的 Welch-overlapped-segment-averaging (WOSA)程序，即将一个时间序列分割成重叠 50%的n_{50}个片段，最终的光谱估计来自于n_{50}个片段的平均。有了τ的估计值以及G_0的适当值，就可以覆盖公式(2)的红噪声谱和从数据估计的谱。假设G_{rr}在每个频率的概率分布服从χ^2分布。还可以测试数据频谱是否与红噪声模型一致。然而，Lomb-Scargle 傅里叶变换在该方法中的应用是有缺陷的，即与经典傅里叶变换相比，单个 Lomb-Scargle 傅里叶分量并不一定相互独立。因此，基于 Lomb-Scargle 变换的估计频谱可能是有偏差的，尤其是，频谱高频端的频谱振幅往往被高估。因此，对于给定的时间序列，基于τ的无偏估计的红噪声谱公式(2)不一定与同一时间序列的“Lomb-Scargle 谱”重合[19]。因此，此方法寻找对 Lomb-Scargle 傅里叶变换的偏差校正。最后得到一个偏差校正的 Lomb-Scargle 周期图。

虽然 REDFIT 程序最初是为研究古气候学中的时间序列开发的，但它也被广泛应用于寻找不同频率下耀变体光变曲线中可能的周期性。例如 Peñil 等人[3]利用 REDFIT 对 2274 个活动星系核的光变曲线进行了周期分析；Li 等人[22]利用 REDFIT 对 S5 0716+714 进行光变周期的分析，得到其约 6.1 年的准周期；Yang 等人[23]利用 REDFIT 对 3FGL J0449.4-4350 的光变曲线进行了周期分析，得到其可能的准周期振荡为 450 天。

4 光变周期的分析

根据 MOJAVE 数据库中找到的这 4 个耀变体源的射电波段观测数据，得到了它们的光变曲线。如图 1 所示(横轴为儒略日，纵轴为流量)。由图可以看出，各个源的光变剧烈，流量变化出现了上升和下降的现象，且可能具有周期性。

本文采用上述的 REDFIT 程序对这 4 个耀变体进行光变周期分析。在 REDFIT 程序中，本文使用的输入参数为 n50=1(折叠次数)，Nsim=10000(蒙特卡洛模拟次数)，ofac=10(Lomb-Scargle 傅里叶变换的过采样因子)，hifac=1(最大频率)和 iwin=0(模型参数)。REDFIT 分析结果如图 2 所示，各子图中红色实线是红噪声，蓝色实线和绿色实线分别是置信度为 99%的χ^2分布曲线和置信度为 99%的蒙特卡洛曲线。在判断光变曲线是否具有周期信号时，本文根据光变曲线的周期图中的峰值是否同时达到 99%的χ^2和 99%蒙特卡洛置信度水平，并结合光变曲线的变化特征和红噪声带来的影响(在周期图的低频段产生一系列虚假的峰)进行判断。周期图中周期信号对应的频谱峰值满足这个条件时，我们认为它是一个可能的周期信号，如果这个周期信号对应的振荡次数在 3 次以上，我们则认为这是一个强周期信号。在周期图中，特别是高频部分可能会存在部分伪周期信号，这可能是由于观测数据的采样率较低，REDFIT 程序不能分辨造成的。

图 2(A)是源 0851+202 的周期图，从图中发现它具有约 1.77 年的强周期信号。Yuan 等[24]发现了它 12.02±0.41 年的光变周期。图 2(B)是源 1308+326 的周期图，从图中可以发现它具有 8.69 年的强周期信号。Qian 等[25]获得的 16.9±0.3 的光变周期可能是这个 8.69 年的周期成分叠加 2 次而成的。图 2(C)是源 1641+399 的周期图，从图中可以发现它具有 2.04 年的强周期信号。Berton 等[26]获得了它 0.28 年的光变周期。图 2(D)是源 2251+158 的周期图，从图中可以发现它具有 7.65 年的强周期信号。Das 等[27]获得了 9 年的光变周期，由于样本之间存在差异，两个周期值的关系难以判断。表 1 第(8)列给出了我们得到的这些强周期信号。由此可见，耀变体的周期性光变是十分复杂的，周期成分可能并不唯一。

表 1 耀变体的光变周期和主黑洞质量

Tab.1 Possible periodicities in the radio light curves and central black hole masses of blazars

Source Name (1)	Source Class (2)	Fermi-LAT Name (3)	Redshift (4)	Observation Time (yr) (5)	Time Span (yr) (6)	AADP (7)	Period (yr) (8)	γ_b (9)	P_d (10)	M $(M_\odot)$ (11)
0851+202	BLLac	J0854.8+2006	0.306	1995.4.7-2021.12.10	26.7	6.65	1.77	11.8±1.7	188.71±3.92	$5.6\times10^{9}\pm1.1\times10^{7}$
1308+326	FSRQ	J1310.5+3221	0.9973	1995.1.20-2021.9.13	26.67	4.04	8.69	14.6±0.7	927.43±2.13	$7.1\times10^{10}\pm4.3\times10^{6}$
1641+399	FSRQ	J1642.9+3948	0.593	1995.1.20-2021.9.13	26.67	4.46	2.04	20.8±1.0	554.04±1.28	$3.1\times10^{10}\pm1.9\times10^{6}$
2251+158	FSRQ	J2253.9+1609	0.859	1995.5.27-2021.12.10	26.56	4.65	7.65	15.7±1.0	1014.33±4.12	$8.2\times10^{10}\pm1.2\times10^{7}$

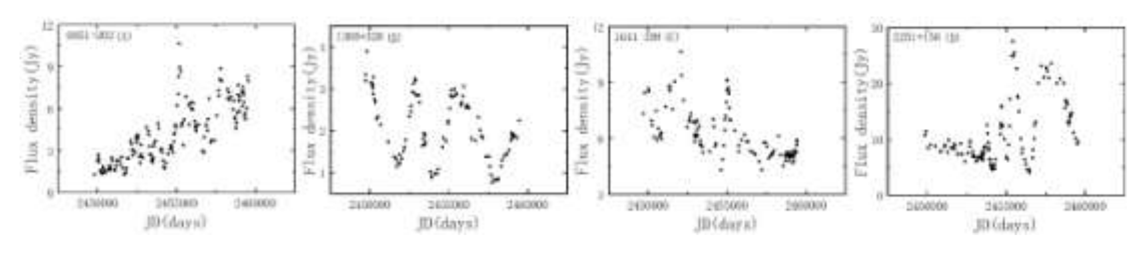


图 1 MOJAVE 15.3 GHz 光变曲线

Fig.1 Radio light curves of blazars at 15.3 GHz obtained from the MOJAVE program

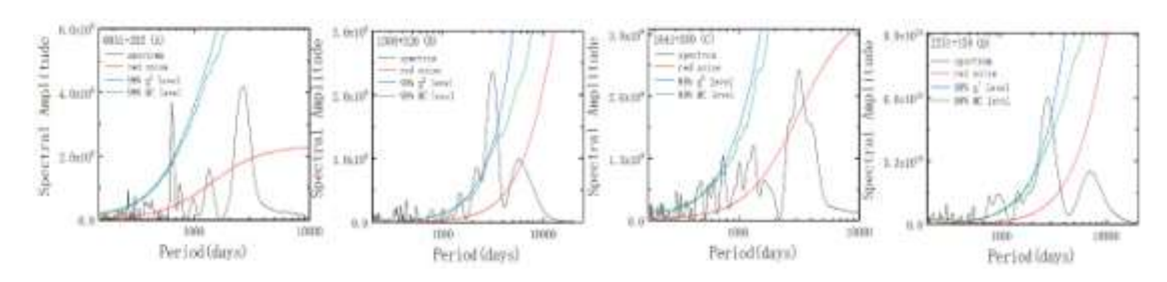


图 2 使用 REDFIT 方法对耀变体的射电波段光变曲线进行分析

Fig.2 The resulting periodicity analysis of the radio light curves of blazars using the REDFIT method

5 讨论和结论

本文收集 MOJAVE 数据库中的射电波段观测数据，利用 REDFIT 对 0851+202 等 4 个耀变体源进行了光变周期的分析，在 0851+202 的光变曲线中发现它存在 1.77 年的周期成分，在 1308+326 的光变曲线中发现它存在 8.69 年的周期成分，在 1641+399 的光变曲线中发现它存在 2.04 年的周期成分，在 2251+158 的光变曲线中发现它存在 7.65 年的周期成分。

目前，周期性光变的理论解释主要有:超大质量双黑洞模型[28–29]、螺旋喷流模型[30–31]、吸积盘的细盘模型[32]。1980 年，Begelman 等[33]第一次提出了超大质量双黑洞的概念，认为双黑洞是星系合并产生的。双黑洞模型多用来解释光变周期的起源，该模型认为黑洞的轨道运动引起了吸积盘和喷流的进动，喷流和视线方向的夹角变化引起了观测上的光变。周期性光变、扭曲的喷流和发射线的双峰结构成为超大质量双黑洞系统存在的间接观测证据[34]。许多研究都使用超大质量双黑洞模型对长时标光变的周期性进行了解释，例如:Sillanpää 等[35]和 Valtonen 等[36]用超大质量双黑洞模型解释了 OJ287 约 12 年的准周期振荡。Tavani 等[37]和 Li 等[38]用超大质量双黑洞模型解释了其他源的光变周期。**陈军平**等[39]用超大质量双黑洞模型解释了**耀变体** CGRaBS J0929 + 5013 和 J2146-1525 的光变周期。**龚云露**等[40]也用超大质量双黑洞模型解释了**耀变体** CGRaBS J0835+6835 的光变周期。

本文使用超大质量双黑洞模型和螺旋喷流模型对耀变体光变周期进行解释。在超大质量双黑洞模型中，观测准周期P与实际物理驱动周期P_d之间的关系为[41]

$$P_d \approx \frac{\gamma_b^2}{1+z}P \tag{3}$$

其中红移z在表 1 中已经给出；γ_b为体洛伦兹因子，各耀变体源的体洛伦兹因子已经列入表 1 第(9)列中[42]；将使用 REDFIT 得到的周期代入(3)式得它们各自的实际物理驱动周期P_d，如表 1 第(10)列所示。如果主黑洞和次黑洞之间的质量比$R \leq \frac{1}{3}$，称之为“主并合”；如果$3 \leq R \leq 10^4$，称之为“次并合”[33]。不管是哪种并合，主黑洞的质量计算都可以用下列公式进行计算[43]

$$M \approx P_d^{\frac{8}{5}} R^{\frac{3}{5}} 10^6 M_\odot \tag{4}$$

其中，对于超大质量双黑洞系统的主次黑洞质量，假设它为$R = \frac{3}{2}$ [23]。将 R 以及各个耀变体源的实际物理驱动周期代入(4)式得到它们各自的主黑洞质量，结果见表 1 第(11)列。耀变体的光变由喷流主导，观测到的周期可能起源于喷流的螺旋进动。而喷流的螺旋进动由超大质量双黑洞的轨道运动驱动，也就是说用超大质量双黑洞模型来解释这些耀变体的中长时标光变是可信的。

此外，螺旋结构的喷流模型也会导致 Blazar 天体的周期性光变。由强磁场或轨道运动导致的扭曲喷流，在视角改变时，由于多普勒效应会使得观测的流量产生变化。对于非均匀旋转螺旋喷流，其中发射物质速度的方向与我们的视线夹角会周期性的变化。由于多普勒增亮效应，就会导致观测的流量周期性变化[44]。这 4 个源都是耀变体，其辐射流量主要来自于喷流中的非热辐射，而超长基线阵列(VLBA)观测发现其喷流呈现扭曲的形状[45]，所以其周期性光变也可能是螺旋喷流旋转造成的。

致谢 感谢审稿人提出的审稿意见。本研究使用了由 MOJAVE 团队维护的 MOJAVE 数据库中的观测数据。

参考文献:

[1] Ulrich M H, Maraschi L, Urry C M. Variability of active galactic nuclei[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1997, 35(1): 445-502.

[2] Urry C M, Padovani P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107(715): 803.

[3] Vaughan S, Uttley P, Markowitz A G, et al. False periodicities in quasar time-domain surveys[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 461(3): 3145-3152.

[4] Covino S, Sandrinelli A, Treves A. Gamma-ray quasi-periodicities of blazars. A cautious approach[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 482(1): 1270-1274.

[5] Roy A, Chitnis V R, Gupta A C, et al. Detection of a quasi-periodic oscillation in the optical light curve of the remarkable blazar AO 0235+ 164[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 513(4): 5238-5244.

[6] Bhatta G. Radio and γ-Ray Variability in the BL Lac PKS 0219− 164: Detection of Quasi-periodic Oscillations in the Radio Light Curve[J]. The Astrophysical Journal, 2017, 847(1): 7.

[7] Gong Y, Zhou L, Yuan M, et al. Quasiperiodic Behavior in the γ-Ray Light Curve of the Blazar PKS 0405-385[J]. The Astrophysical Journal, 2022, 931(2): 168.

[8] Wang G G, Cai J T, Fan J H. A Possible 3 yr Quasi-periodic Oscillation in γ-Ray Emission from the FSRQ S5 1044+ 71[J]. The Astrophysical Journal, 2022, 929(2): 130.

[9] Zhang P, Wang Z. A Radio Quasi-periodic Oscillation of 176 days in the Radio-loud Narrow-line Seyfert 1 Galaxy J0849+ 5108[J]. The Astrophysical Journal, 2021, 914(1): 1.

[10] Li X P, Cai Y, Yang H T, et al. Detection of quasi-periodic oscillations in the long-term radio light curves of the blazar OT 081[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 506(1): 1540-1547.

[11] Bhatta G, Dhital N. The nature of γ-ray variability in blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2020, 891(2): 120.

[12] Peñil P, Domínguez A, Buson S, et al. Systematic search for γ-ray periodicity in active galactic nuclei detected by the fermi large area telescope[J]. The Astrophysical Journal, 2020, 896(2): 134.

[13] Lister M L, Aller M F, Aller H D, et al. MOJAVE. XV. VLBA 15 GHz total intensity and polarization maps of 437 parsec-scale AGN jets from 1996 to 2017[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2018, 234(1): 12.

[14] Fan J H, Xie G Z, Pecontal E, et al. Historic light curve and long-term optical variation of BL Lacertae 2200+ 420[J]. The Astrophysical Journal, 1998, 507(1): 173.

[15] 安涛, 王俊义, 陆相龙, 等. 天文光变周期提取算法综述[J]. 天文学进展, 2016, 34(1): 74-93.

AN T, WANG J Y, LU X L, et al. Review of Periodicity Searching Algorithms of Astronomical Light Curves[J]. Progress in Astronomy, 2016, 34(1): 74-93.

[16] 李孝攀, 罗玉辉, 周丽, 等. 耀变体 PKS 0537－441 的光学谱特性[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2017, 47(3): 101-108.

LI X P, LUO Y H, ZHOU L, et al. Optical spectral behaviour of the blazar PKS 0537-441[J]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2017, 47(3): 101-108.
[17] 王俊义, 陆相龙, 赵秋雯, 等. SS 433 的周期性 X 射线光变研究[J]. 天文学报, 2016, 57(2): 139-155.
WANG J Y, LU X L, ZHAO Q W, et al. Periodicity Analysis of X-ray Light Curves of SS 433[J]. Acta Astronomica Sinica, 2016, 57(2): 139-155.
[18] Hasselmann K. Stochastic climate models part I. Theory[J]. tellus, 1976, 28(6): 473-485.
[19] Schulz M, Mudelsee M. REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(3): 421-426.
[20] Mudelsee M. TAUEST: A computer program for estimating persistence in unevenly spaced weather/climate time series[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(1): 69-72.
[21] Schulz M, Stattegger K. SPECTRUM: Spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series[J]. Computers & Geosciences, 1997, 23(9): 929-945.
[22] Li X P, Luo Y H, Yang H Y, et al. Radio variability of the blazar S5 0716+ 714: a~ 6.1 year quasi-periodicity[J]. Astrophysics and Space Science, 2018, 363(8): 1-7.
[23] Yang X, Yi T, Zhang Y, et al. The γ-Ray and Optical Variability Analysis of the BL Lac Object 3FGL J0449. 4- 4350[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2020, 132(1010): 044101.
[24] Yuan Y H, Fan J H, Wu H, et al. Optical monitoring and intra-day variabilities of BL Lac Objects OJ 287[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(6): 138.
[25] Qian S J, Britzen S, Witzel A, et al. Possible quasi-periodic ejections in quasar B1308+ 326[J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 604: A90.
[26] Berton M, Liao N H, La Mura G, et al. The flat-spectrum radio quasar 3C 345 from the high to the low emission state[J]. Astronomy & Astrophysics, 2018, 614: A148.
[27] Das A K, Prince R, Gupta N. Gamma-Ray Flares in the Long-term Light Curve of 3C 454.3[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020, 248(1): 8.
[28] Xie G Z, Liang E W, Zhou S B, et al. Photometry of three gamma-ray-loud quasars and implications for supermassive black holes[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2002, 334(2): 459-470.
[29] Sillanpaa A, Haarala S, Valtonen M J, et al. OJ 287-Binary pair of supermassive black holes[J]. The Astrophysical Journal, 1988, 325: 628-634.
[30] Rani B, Wiita P J, Gupta A C. Nearly periodic fluctuations in the long-term x-ray light curves of the blazars AO 0235+ 164 and 1ES 2321+ 419[J]. The Astrophysical Journal, 2009, 696(2): 2170.
[31] Lainela M, Takalo L O, Sillanpää A, et al. The 65 day period in 3C 66A during bright state[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 521(2): 561.
[32] Zhang X, Xie G Z, Bai J M. A historical light curve of 3C 345 and its periodic analysis[J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 330: 469-473.
[33] Begelman M C, Blandford R D, Rees M J. Massive black hole binaries in active galactic nuclei[J]. Nature, 1980, 287(5780): 307-309.
[34] 李孝攀, 张皓晶, 张雄. 类星体 PKS1510-089 的 X 射线流量变化周期特性[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 837-842.

LI X P, ZHANG H J, ZHANG X. Characteristic periodicity analysis of the X-ray flux variability of quasar PKS 1510-089[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 837-842.
[35] Sillanpaa A, Takalo L O, Pursimo T, et al. Confirmation of the 12-year optical outburst cycle in blazar OJ 287[J]. Astronomy and Astrophysics, 1996, 305: L17.
[36] Valtonen M J, Lehto H J, Nilsson K, et al. A massive binary black-hole system in OJ 287 and a test of general relativity[J]. Nature, 2008, 452(7189): 851-853.
[37] Tavani M, Cavaliere A, Munar-Adrover P, et al. The blazar PG 1553+ 113 as a binary system of supermassive black holes[J]. The Astrophysical Journal, 2018, 854(1): 11.
[38] Li X P, Luo Y H, Yang H Y, et al. A Search for Quasi-periodic Oscillations in the Blazar 1ES 1959+ 650[J]. The Astrophysical Journal, 2017, 847(1): 8.
[39] 陈军平, 马力, 龚云露, 等. 耀变体CGRaBS J0929+5013和J2146-1525光变相关性及准周期分析[J].天文研究与技术,2022,19(3):189-197.
CHEN J P , MA L, GONG L Y, et al. Correlation and Quasi-periodic Oscillation Analysis of Light Variation in Blazar CGRaBS J0929+5013 and J2146-1525[J]. Astronomical Research & Technology, 2022,19(3):189-197.
[40] 龚云露, 易庭丰, 杨星, 等. 耀变体 CGRaBS J0835+ 6835 的射电准周期振荡及多普勒因子分析[J]. 天文研究与技术,2021,18(2):145-152.
GONG Y L, YI T F, YANG X, et al. Radio Quasi-period Oscillation Analysis of Blazar CGRaBS J0835 + 6835[J]. Astronomical Research & Technology, 2021,18(2):145-152.
[41] Rieger F M. On the geometrical origin of periodicity in blazar-type sources[J]. The Astrophysical Journal, 2004, 615(1): L5.
[42] Weaver Z R, Jorstad S G, Marscher A P, et al. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz during 10 yr of the VLBA-BU-BLAZAR Program[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2022, 260(1): 12.
[43] Lee W H, Abramowicz M A, Kluźniak W. Resonance in forced oscillations of an accretion disk and Kilohertz quasi-periodic oscillations[J]. The Astrophysical Journal, 2004, 603(2): L93.
[44] 程岩,刘风,孙中诺,等.Blazar 天体 3C 66A 光学波段准周期光变分析[J].天文学报,2022,63(02):36-42.
CHENG Y, LIU F, SUN Z N, et al. Analysis of Quasi-periodic Variability in the Optical Light Curve of Blazar 3C 66A[J]. Acta Astronomica Sinica, 2022,63(02):36-42.
[45] Böttcher M, Harvey J, Joshi M, et al. Coordinated multiwavelength observation of 3C 66A during the WEBT campaign of 2003-2004[J]. The Astrophysical Journal, 2005, 631(1): 169.

Quasi-periodic Variations in the Radio Light Curves of Fermi Blazars

Wen Yi, Xiao Yuting, Li Xiaopan, Yang Haiyan*

(School of Physics and Information Engineering, Zhaotong University, Zhaotong 657000)

Abstract: We search for possible periodicity in the MOJAVE（Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments）observations at 15.3 GHz of eight Fermi blazars using the REDFIT method. Possible periodic components of about 1.77, 8.69, 2.04 and 7.65 years were found in the sources 0851+202, 1308+326, 1641+399 and 2251+158 at a 99% confidence level, respectively. The super-massive binary black hole model and the helical jet model have been used to explain these periodicities. And they are also used to caculate the central black hole masses of the f our sources which is $10^9 M_\odot \sim 10^{10} M_\odot$.

Key word: Blazar; REDFIT method; Period of light variation; Central black hole masses